DOI:10.22067/jfcei.2022.73443.1075
سال سی و چهار، شمارهٔ چهار، ۱۴۰۰

کاربرد زمین آمار در شناسایی محل‌های با پتانسیل بالای فرار آب در سد تنگاب*

مقاله پژوهشی

رضا دهشیبی(۱) رضا جهانشاهی(۲) مرتضی مظفری(۳) امین عصاری(٤)

چکیده *سد تنگاب در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز و ۱۲ کیلومتری شمال غربی شهر فیروزآباد بر روی رودخانه فیروزآباد احداث شده است. این سد در زون زاگرس و بر روی تاقدیس آهکی پودنو قرار دارد. محا سبات بیلان ن شان داده ا ست که در این سد احتمال فرار آب از مخزن و تکیه‌گاه‌های وجود دارد. در این پژوهش تحلیل اکتشافی-مکانی داده‌ها شامل بررسی نقشه‌های موقعیت مکانی، پارامترهای آماری، نمودار فراوانی و تغییرنما بر روی متغیرهای شاخص کیفیت سنگ، لوژان و متغیرسیمان‌خوری صورت گرفته است و جهت شناسایی زون‌های تراوا از روش‌های شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده‌شده است. متغیرهای مذکور در ترازهای ارتفاعی مختلف، تغییرات زیادی دا شته ا ست. پیو ستگی مکانی سیمانخوری بر مبنای تغییرنمای بدون جهت، ۱۰۰ متر بد ست آمده ا ست. در حالیکه این پیوستگی در متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان بر اساس تغییرنمای جهت دار، به ترتیب بین ۴۰۰-۲۰۰ و ۱٦۰-٤۰ متر متغیر است. درنهایت با توجه به نقشه‌های شبیه سازی سه متغیر لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری و تجزیه و تحلیل نقشه‌های احتمال و عدم قطعیت متغیرهای مذکور در منطقه موردمطالعه، مشاهده شد در دو محل واقع در مرکز مخزن و شمال غربی سد، مناطقی با نفوذپذیری بالا وجود دارد. لذا پتانسیل فرار آب نیز در این مکان‌ها بیشتراست. بررسی گسل‌های منطقه موردمطالعه نیز نشان داد تراکم گسل‌ها بیشتر در جناح راست سد بوده و این می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری در این منطقه باشد.*

واژه‌های کلیدی سیمان‌خوری، شاخص کیفیت سنگ، لوژان، مدل‌سازی زمین‌آمار.

مقدمه

در مطالعات ساختگاه سدها، بررسی وضعیت نفوذپذیری و درزه‌ها و رفتار هیدروژئومکانیکی، یکی از ملزومات اساسی مراحل اکتشافی به شمار می‌رود. به‌دلیل پیچیده بودن شرایط زمین‌شناسی، اندازه‌گیری داده‌های هیدروژئولوژیکی مثل قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی ممکن است عدم قطعیت قابل‌توجهی را نشان دهند. بر این اساس، تخمین و شبیه‌سازی داده‌های هیدروژئولوژیکی با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش‌های زمین‌آمار به‌طور گسترده‌ای در تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان و بررسی عدم قطعیت پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی استفاده‌شده‌اند.

یکی از روش‌های مدل‌سازی هندسه لایه‌های تراوا، استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری است. این روش در مدل‌سازی سیستم شکستگی‌ها به‌منظور مطالعه جریانات سیالات در درون سنگ‌ها استفاده می‌شود [1]. در این روش پس از تجزیه‌وتحلیل داده‌های مکانی، بر اساس پارامترهای آماری به‌دست‌آمده شبیه‌سازی متغیرها انجام می‌پذیرد [2]. مطالعات متعددی در سطح ایران و جهان با استفاده از زمین‌آمار و مدل‌سازی در خصوص نفوذپذیری، زمین شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی انجام‌شده است که ازجمله می‌توان به [3]، [4]، [5]، [٦]، [۷]، [۸]، [9]، [10]، [11]، [12]، [۱۳]،[14]،[۱۵]، [22]، [23] ، [24]، [25] ، [26] و [27] اشاره کرد.

تغییرنما اساسی‌ترین ابزار در زمین‌آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود. تغییرنما، کمیتی برداری که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دونقطه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد معمولاً تغییرنما را با علامت $\gamma(h)$ نشان می‌دهند و از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود[28].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum \left(z(x_i + h) - z(x_i)\right)^2 \qquad (1)$$

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۸/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۰/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد آب شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
(۲) نویسنده مسئول: دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
(۳) استادیار دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران.
(٤) دکتری آب‌شناسی، دفتر تحقیق و توسعه، معدن سنگ آهن گهرزمین، سیرجان.

Email: jahanshahireza@science.usb.ac.ir

که در آن N(h)، تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته در محاسبه که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند؛ Z(xi)، مقدار مشاهده شد متغیر موردنظر و Z(xi+h)، مقدار مشاهده شد متغیر موردنظر که به فاصله h از Z(xi) قرار دارد، است (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸٤). اگر در محاسبه تغییرنما به ازای هر لگ معین، بردار h نظیر آن لگ در فضا در هر جهتی بتواند قرار گیرد، در این صورت تغییرنمای حاصل را تغییرنمای بدون جهت می‌نامند [۲۹]. این‌گونه تغییرنماها برای بیان تغییرنمای کلی منطقه مناسب می‌باشند و در مواردی که تعداد نقاط اندک باشد این‌گونه تغییرنماها اطلاعات کلی‌تری در مورد منطقه به دست می‌دهند [۳۰]. پس‌ازآنکه یک‌روند و ساختار مشخص برای تغییرنمای بدون جهت محاسبه گردید، در مرحله بعدی می‌توان تغییرنمای جهت‌دار و ناهمسانگردی را محاسبه نمود. تغییرنمای جهت‌دار را می‌توان این‌گونه تعریف نمود. اگر در محاسبه تغییرنما فقط از زوج نقاطی که بردار h آن‌ها (برداری که دونقطه را به هم وصل می‌کند) در امتداد معین و معلومی قرار داشته باشد، استفاده شود، در این صورت آن تغییرنما را تغییرنمای جهت‌دار می‌گویند [۲۹]. معمولاً در مطالعات زمین‌شناسی با توجه به هدف موردمطالعه که بیشتر اوقات بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و به‌ندرت باهدف بررسی ویژگی‌های آماری است، نمونه‌ها به‌صورت منظم برداشت نمی‌شوند، درنتیجه استراتژی‌های نمونه‌برداری سبب شده است که در مناطقی مقادیر بالای یک متغیر متمرکزشده باشند. هرچند این مناطق ممکن است اطلاعات مفیدی به دست بدهند ولی نماینده سایر نقاط باقیمانده نیستند. برای به دست آوردن یک تخمین مناسب از میانگین داده‌های جامع می‌باید نمونه‌های موجود به‌گونه‌ای وزن دهی شوند که داده‌های کلاستره شده اثر بیش‌ازحدی را بر روی تخمین میانگین نگذارند .برای دکلاستره نمودن داده‌ها دو روش دکلاسترینگ چندضلعی و دکلاسترینگ سلولی وجود دارد. پیوستگی مکانی در بسیاری از متغیرهای موردبررسی در داده‌های علوم زمین وجود دارد. به‌طوری‌که بین داده برداشته‌شده در یک نقطه و داده‌های برداشته‌شده در نقاط دیگر که به فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند، یکسری مشابهت‌ها و تفاوت‌هایی وجود دارد. دو داده برداشته‌شده در فاصله کم، عمدتاً مشابهت بیشتری نسبت به دو داده برداشته‌شده در فاصله بیشتر دارند. اگرچه بررسی تعدادی از نمودارهای پراکندگی برداری ، توصیفی نسبتاً کامل را از پیوستگی مکانی یک متغیر ارائه می‌دهند، ولی این نمودارها حاوی اطلاعات کمی می‌باشند و نیاز به‌نوعی پارامتر خلاصه کننده دارند. سه تابع خلاصه کننده پیوستگی مکانی یک متغیر، ازجمله توابع ضریب همبستگی ، توابع کوواریانسی و تغییر نماها . تمامی این توابع از یکسری پارامترهای آماری برای خلاصه نمودن نمودارهای پراکندگی برداری و ارائه آن، به صورتی که نشان‌دهنده تغییرات پیوستگی مکانی یک متغیر بافاصله و جهت باشد، بهره می‌برند. از بین آن‌ها تغییر نما مهم‌ترین ابزار برای بررسی پیوستگی مکانی بین داده‌هاست [۳۰].

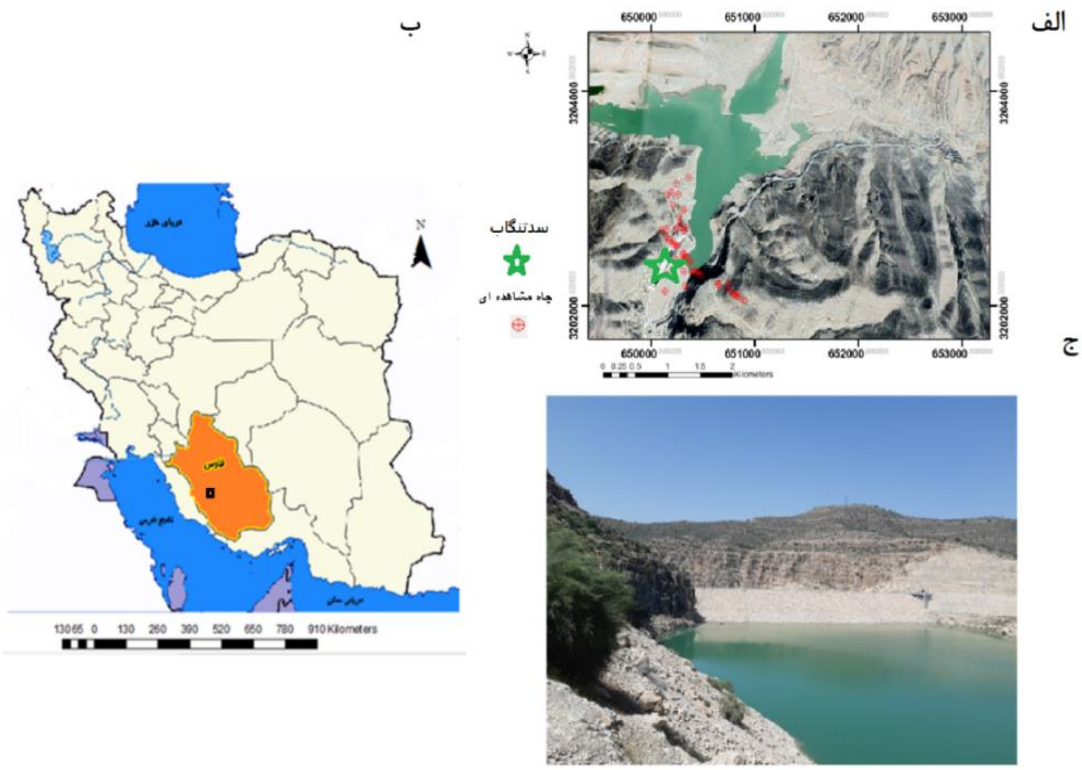
در استان فارس، سد مخزنی تنگاب بخشی از آب آبیاری دشت فیروزآباد را تأمین می‌نماید. محاسبات بیلان توسط شرکت آب منطقه ای استان فارس و مطالعات قبلی نشان می‌دهد بخش زیادی از آب مخزن از طریق قسمت‌هایی از تکیه‌گاه‌های سد فرار می‌کند. لذا پرسشی که ایجاد می‌شود این است که ازنظر زمین‌شناسی در چه مناطقی در اطراف این سد، پتانسیل فرار آب بالا است. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از بررسی پیوستگی مکانی داده‌های متغیرهای لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری گمانه‌های اکتشافی درنهایت شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری متغیرهای ذکرشده در منطقه موردمطالعه به این پرسش پاسخ داده شود. لازم به ذکر است پیش‌ازاین تحقیق، در محدوده‌ی مطالعاتی پژوهش‌های هیدروژئولوژی و مدل‌سازی نیز انجام‌شده است [۱٦]. در مطالعه‌ای احتمال فرار آب در سد تنگاب را با استفاده از ردیاب‌های رنگی بررسی کرده است. مشاهدات نشانگر وجود ارتباط هیدروژئولوژی بین ساختگاه سد و چشمه‌های محدوده تنگاب (روستای آتشکده) است. بر اساس رفتار رنگ نمودهای به‌دست‌آمده، این ارتباط از طریق یک سیستم کارستی تک مجرایی برقرار گردیده است. در پژوهشی دیگر [17]. در منطقه سد تنگاب، با استفاده از بررسی سری زمانی پارامترهای هیدرو شیمی چشمه‌ها، به شناسایی منبع چشمه‌ها و ارتباط آن‌ها با یکدیگر پرداختند. بخشی از آبخوان توسط ۲۳ چشمه در سمت جنوب تخلیه می‌شود. یون‌های اصلی، هدایت الکتریکی، دما و pH این چشمه‌ها اندازه‌گیری شدند. این پارامترها نشان می‌دهد که منابع چهار چشمه، احتمالاً در قسمت‌های جنوبی قرار دارند و منابع دیگر چشمه‌ها هم در طرف‌های جنوبی و شمالی هستند. این بدان معنی است که همه این چشمه‌ها یک منبع مشترک و

یک حوضه آبریز مشترک دارند [18]. از نتایج تست لوژان، برای ارزیابی تخلخل مؤثر و توسعه کارست در سد تنگاب استفاده کرده‌اند. در این تحقیق رفتار آبخوان کارستی، نقش منطقه اپی کارستی، نقش تغذیه در آبخوان‌های کارستی و اثر آن بر هیدرو گراف چشمه، مورد ارزیابی قرار گرفت و ارتباط کارستی شدن بر میزان نفوذپذیری (لوژان) بررسی‌شده است. در این پژوهش مشخص شد که یکی از مؤثرترین عوامل تأثیرگذار بر هیدرو گراف و تغییرات نوسان آب، طول مجرای اصلی کارستی است [۱۹]. نشت در جناح راست سد تنگاب را موردبررسی قرارداده اند. این تحقیق بر مبنای مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار seep/w درزمینه جریان آب در خاک انجام‌شده است. نتیجه پیش‌بینی پژوهش نشان داده است عمده نشت از طریق مناطق کارستی و درزه و شکاف‌ها رخ‌داده است.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

سد تنگاب در استان فارس، در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شیراز (۱۲ کیلومتری شمال غربی شهر فیروزآباد، در مسیر فیروزآباد – کوار) بر روی رودخانه فیروزآباد واقع‌شده است (شکل –۱)، این سد در زون زاگرس چین‌خورده و بر روی تاقدیس پودنو قرار دارد. این تاقدیس عمدتاً از سازند آهکی آسماری (الیگومیوسن) تشکیل‌شده است و از بالا به‌وسیله سازند مارنی رازک و از زیر به‌وسیله سازند مارنی پابده گورپی (پالئوسن–الیگوسن) محصورشده است [۲۰]. سازند رازک در محدوده مخزن گسترش دارد و به دلیل اینکه از مارن و تبخیری‌ها تشکیل یافته‌اند از قابلیت نفوذ و آبگذری قابل‌توجهی برخوردار نیستند. لذا تنها، محدوده سازند آسماری که دیواره دره ساختگاه سد را می‌سازد قابلیت آبگذری دارد. آهک های سازند آسماری از استعداد کارست شدگی بالایی برخوردار بوده و وجود میان لایه‌های مارنی و مارن آهکی باعث توسعه کارست در اطراف این لایه‌ها شده است. این پدیده‌های کارستی در امتداد درزه‌ها و گسل‌های عمده که شیبی نزدیک به قائم دارند و توسط مواد ریزدانه پرشده‌اند توسعه بیشتری دارند [۲۱].



شکل ۱ (الف) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد، (ب) موقعیت سد تنگاب در استان فارس و (ج) نمایی از سد تنگاب، جهت نگاه به جنوب غرب

روش کار

در این پژوهش، مطالعات زمین آماری بر روی داده های لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان خوری چاههای اکتشافی در محدوده سد تنگاب انجام شده است که شامل موارد: تحلیل اکتشافی-مکانی داده‌ها، دکلاستره نمودن داده‌ها، -بررسی هیستوگرام یا نمودارهای جعبه‌ای متغیرهای مختلف، بررسی تغییرات متغیرها درترازهای ارتفاعی مختلف، بررسی رابطه احتمالی بین متغیرهای مختلف با استفاده از نمودارهای پراکندگی، تهیه نقشه‌های تغییرنما و بررسی وجود و یا عدم وجود آنایزوتروپی احتمالی، مدل‌سازی زمین‌آمار (با استفاده از نرم افزار زمین آماری ایساتیس) شامل: ایجاد شبکه جهت انجام شبیه‌سازی گاوسی، انجام شبیه‌سازی گاوسی، تعیین حد آستانه‌های مختلف و بررسی تغییرات متغیرها در منطقه موردمطالعه، پردازش شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و کمی سازی عدم قطعیت و در نهایت شناسایی زون‌های تراوا می باشد.

به‌کارگیری اصل توالی تحت مدل چند گوسی توابع تصادفی را شبیه‌سازی گوسی متوالی می‌گویند. این الگوریتم برای شبیه‌سازی یک مشخصه واحد با استفاده از مقادیر واحد و سپس به دست آوردن اطلاعات ثانویه و شبیه‌سازی مشترک چندین مشخصه وابسته، معرفی‌شده است. این الگوریتم برای انجام شبیه‌سازی به داده‌های نرمال استاندارد نیاز دارد. برای شبیه‌سازی پیوستگی مشخصه z در N گره در شبکه مشروط به مجموعه داده $\{z(ua), a = 1, \dots, n\}$ است. مراحل شبیه‌سازی گوسی متوالی به‌صورت زیر است:

۱. اولین گام برر سی کردن صحت مدل چند گو سی ا ست که نیاز به‌رسم هیستوگرام برای داده‌های اولیه و نرمال کردن داده‌ها و تبدیل z-data به y-data با یک تابع توزیع تجمعی (cdf) استاندارد نرمال است.

۲. اگر مدل چند گوسی برای متغیر y حفظ شد، در این حالت می‌توان شبیه سازی گو سی متوالی را به صورت مراحل زیر برای y-data انجام داد:

- ترسیم تغییرنما با استفاده از داده‌های نرمال شده.
- انتخاب مسیر تصادفی برای انجام شبیه سازی به‌طوری‌که هر گره شبکه فقط یک‌بار شبیه‌سازی می‌شود.
- در هر گره u' پارامترهای میانگین و واریانس تابع توزیع تجمعی گوسی تعیین می‌گردند و سپس با انجام کریجینگ ساده با استفاده از مدل تغییرنمای داده‌های نرمال شده، تخمین داده‌ها بر روی شبکه صورت می‌گیرد.
- بیرون کشیدن مقدار شبیه سازی‌شده از تابع توزیع تجمعی و اضافه کردن آن به مجموعه داده‌ها.
- رفتن به گره بعدی در طول مسیر تصادفی و تکرار دو مرحله قبلی.
- تکرار کلیه مراحل بالا تا اینکه N گره شبیه سازی شوند و کل شبکه دارای عدد شود [28].
- شبیه‌سازی گوسی متوالی یک‌راه سریع و ساده برای انجام شبیه‌سازی زمین‌آماری است؛ زیرا برای مدل‌سازی گوسی در هر مکان نیاز به حل کردن تنها یک سیستم کریجینگ در آن مکان است. اما درعین‌حال توانایی نشان دادن پیوستگی مکانی برای طبقات مختلف مقادیر را ندارد و همچنین امکان شبیه‌سازی مقادیر انتهایی بزرگ را فراهم نمی‌کند.

نتایج و بحث

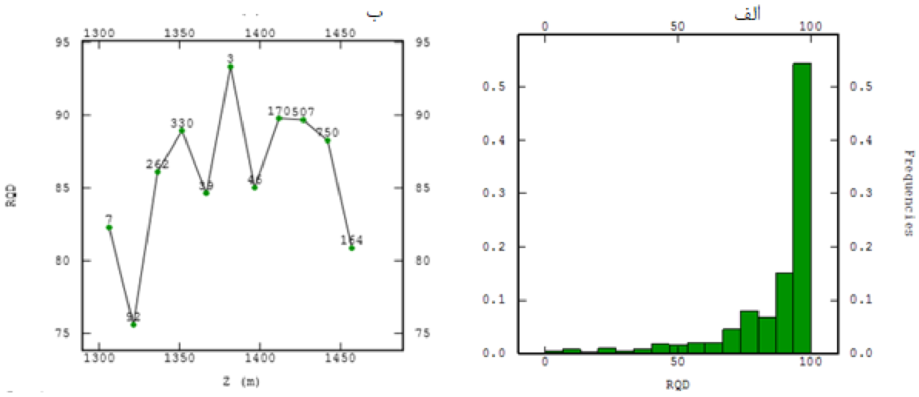
تحلیل اکتشافی- مکانی

بررسی آمار مقدماتی بر روی ۲۳۷۰ داده شاخص کیفیت سنگ، ۱۱۷۷ داده لوژان و ۱۱۸٤ داده سیمان خوری گمانه‌های اکتشافی حفرشده در تکیه‌گاه‌های سد تنگاب انجام‌شده است؛ میانگین، واریانس و انحراف معیار متغیر شاخص کیفیت سنگ به ترتیب برابر با ۸۷/۳۸، ۳٦٤/۱۳ و ۰۸/ ۱۹ است (جدول ۱). نمودار هیستوگرام فراوانی آن (شکل ۲) نشان‌دهنده چولگی منفی و عدم نرمال بودن داده‌ها است. ازآنجایی‌که دامنه تغییرات آن دارای مقادیر بالاست، این موضوع نشان‌دهنده وجود مقادیر بالا در کنار مقادیر پایین شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف ارتفاعی است. همان‌طور که اشاره شد داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند و جهت انجام شبیه‌سازی یا تخمین و محاسبات زمین‌آماری نیاز به نرمال کردن داده‌ها است.

شکل (۲-ب) نشان می‌دهد که میانگین متغیر شاخص کیفیت سنگ درترازهای مختلف (بین تراز های ۱۲۹۸ تا ۱٤۵۰ متر از سطح دریا) داری نوسان است و ازآنجایی‌که دامنه تغییرات و پراکندگی داده‌ها زیاد است؛ لذا میانگین نمی‌تواند معیار خوبی جهت مقایسه این متغیر درترازهای مختلف باشد.

جدول ۱ آمار مقدماتی شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمانخوری بدون تخصیص وزن

متغیر	تعداد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی	دامنه تغییرات	ضریب تغییرات
شاخص کیفیت سنگ	۲۳۷۰	۰	۱۰۰	۸۷/۳۸	۱۹/۰۸	۳۶٤/۱۳	-۲/۱٦	۷/۸۳	۱۰۰	۰/۲۲
لوژان	۱۱۷۷	۰	۲۱۱/۲	٦/۱۵	۱۸/۰۹	۳۲۷/۳۳	۵/٦۹	٤٤/۷۹	۲۱۱/۲	۰/۵۸
سیمان‌خوری	۱۱۸٤	۰	۳٤۷۱۸/٦	۳۳۸/٦	۱٦۸۲/۸	۲۸۳۱۸۰۸	۱۲/٦۰	۲۱۱/۰۱	۳٤۷۱۸/٦	٤/۹٦

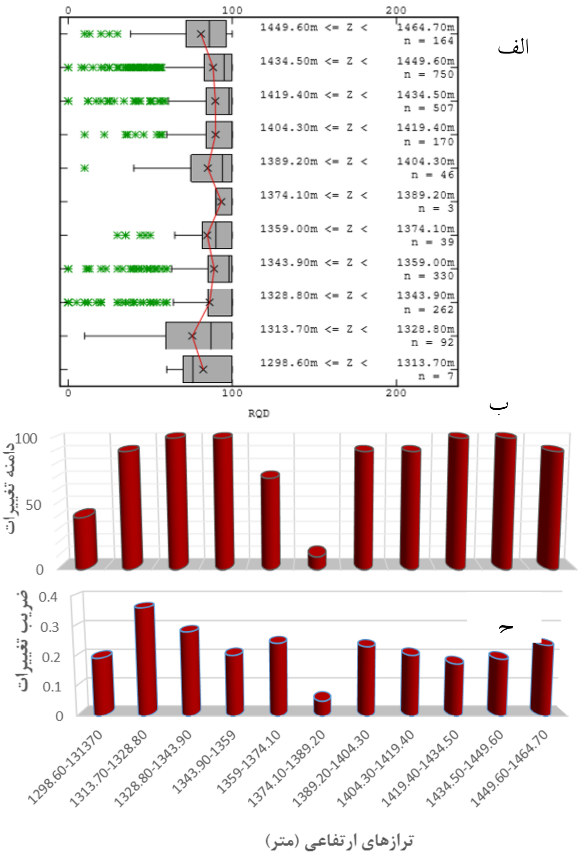


شکل ۲ هیستوگرام مقادیر شاخص کیفیت سنگ و تغییرات میانگین آن در ترازهای ارتفاعی مختلف

در نمودار جعبه‌ای (شکل۳-الف) تغییرات متغیر شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف ارتفاعی نشان می‌دهد مقدار میانگین شاخص کیفیت سنگ در بیشتر ترازها از مقدار میانه کمتر است؛ که این موضوع نشان‌دهنده چولگی منفی در اکثر ترازها بوده و متغیر به سمت مقادیر کمتر میل کرده است. در تراز ارتفاعی ۱۲۹۸/٦۰-۷۰/ ۱۳۱۳ متر از سطح دریا مقدار میانگین بیشتر از مقدار میانه بوده که بیانگر چولگی مثبت در این تراز بوده است. نمودار میله‌ای دامنه تغییرات در مقابل ترازهای ارتفاعی مختلف (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد در تراز ارتفاعی ۱۳۷٤/۱۰- ۱۳۸۹/۲۰. (متر از سطح دریا) کمترین دامنه تغییرات وجود دارد و اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار متغیر برابر ۱۰ است. در رتبه دوم، تراز ارتفاعی۶۰ /۱۲۹۸ تا ۱۳۱۳/۷۰ متر است که اختلاف مقادیر بیشینه و کمینه آن برابر ٤۰ است. وجود مقادیر بالا در دامنه تغییرات، در بعضی از ترازهای ارتفاعی، پراکندگی شدید داده‌ها را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد و به این معناست که در هر تراز مقادیر بالای متغیر می‌تواند در کنار مقادیر پایین قرار داشته باشد. لذا معمولاً جهت مقایسه و بررسی تغییرات متغیر در ترازهای مختلف مقدار ضریب تغییرات برای هر تراز محاسبه می‌شود. هرچه مقدار ضریب تغییرات بیشتر باشد نشان‌دهنده تغییرات شدیدتر متغیر در آن تراز ارتفاعی است. با توجه آمار مقدماتی متغیر شاخص کیفیت سنگ در ترازهای مختلف بدون تخصیص وزن، مشاهده‌شده است که بیشترین مقدار انحراف معیار در تراز ارتفاعی ۱۳۱۳/۷۰-۱۳۲۸/۸۰ (مترازسطح دریا) و برابر با ۲۷/۵٦ است. با توجه به محاسبه ضریب تغییرات متغیر در ترازهای ارتفاعی، بیشترین تغییرات در تراز ارتفاعی ۱۳۲۸/۸۰- ۱۳۱۳/۷۰ (متر) قرار دارد و ضریب تغییرات آن برابر ۰/۳٦ است و کمترین مقدار ضریب تغییرات مربوط به تراز ۱۳۷٤/۱۰ تا ۱۳۸۹/۲۰ (مترازسطح دریا) است که مقدار آن ۰/۰۵ است (شکل۳-ج). همان‌طور که پیش‌ازاین اشاره شد با توجه به هیستوگرام، متغیر شاخص کیفیت سنگ از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند و بدین منظور، داده‌ها با روش تبدیل نرمال گاوسی به نرمال تبدیل‌شده است.

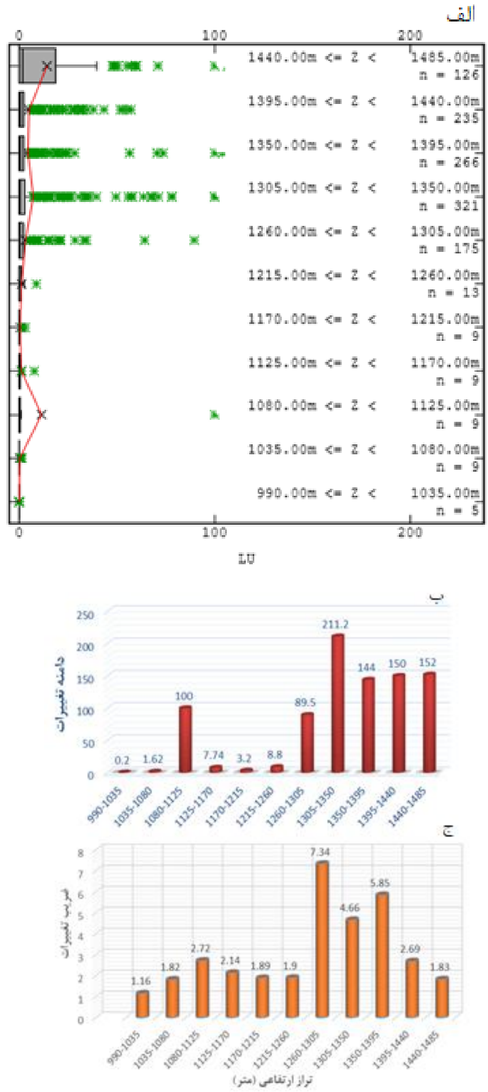
نتایج آمار مقدماتی متغیر لوژان بدون تخصیص وزن (دکلاسترینگ) در جدول (۱) نشان می‌دهد که مقادیر میانگین و چولگی به ترتیب برابر با ٦/۱۵ و ۵/٦۹ است. با بررسی میزان دامنه تغییرات برابر با ۲۱۱/۲ و شاخص‌های پراکندگی مشخص است که مقادیر لوژان در ترازهای مختلف در نوسان بوده است و بیانگر تغییرات این متغیر در ترازهای مختلف است. ازآنجایی‌که

دامنه تغییرات داده‌ها زیاد بوده و اختلاف میان بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین داده لوژان در هر تراز مقدار بالایی را نشان می‌دهد؛ میانگین نمی‌تواند معیار خوبی جهت مقایسه لوژان در ترازهای مختلف باشد. تغییرات لوژان در تراز ارتفاعی مختلف در نمودار جعبه‌ای شکل (٤)،نشان می‌دهد در بیشتر ترازها مقدار میانگین بزرگ‌تر از مقدار میانه است؛ که نشان‌دهنده چولگی مثبت در توزیع این متغیر است. مقدار دامنه تغییرات لوژان در برابر ترازهای ارتفاعی مختلف در نمودار میله‌ای شکل (٤–ب) نشان می‌دهد کمترین دامنه تغییرات لوژان در تراز ارتفاعی ۱۲۱۵–۱۱۷۰ متر از سطح دریا، و بیشترین ضریب تغییرات در ترازهای ارتفاعی ۱۲٦۰–۱۳۰۵۰ و ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵ (متر از سطح دریا) قرار دارد (شکل٤–ج). همچنین نتایج آمار مقدماتی میزان سیمان خوری در گمانه‌های اطراف سد (جدول ۱) ، نشان می‌دهد توزیع این پارامتر به‌صورت نرمال نبوده و چولگی مثبت، نشان‌دهنده عدم تقارن داده‌ها است.



شکل ۳ نمودار جعبه‌ای (الف)، دامنه تغییرات (ب) و ضریب تغییرات (ج) شاخص کیفیت سنگ درترازهای ارتفاعی مختلف

همان‌طور که قبلاً بیان شد، عدم توزیع یکنواخت مکانی داده‌ها، به‌شدت پارامترهای آماری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور لازم است قبل از تحلیل آماری داده‌ها، وزن مناسب برای هر داده تعیین گردد. در این مطالعه از روش دکلاسترینگ سلولی در کلاستره نمودن متغیرهای شاخص کیفیت سنگ و لوژان استفاده‌شده است. مقدار میانگین متغیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان قبل از دکلاسترینگ به ترتیب ۸۷/۳۸ و ٦/۱۵ بوده است که پس از اعمال وزن دهی به ۹۱/۸۷ و ۵/۹۱ تغییر یافته است. بنابراین اعمال وزن دکلاسترینگ بر روی‌داده‌ها تأثیر چندان زیادی بر مقدار میانگین نداشت که نشان‌دهنده توزیع مکانی نسبتاً یکنواخت داده‌ها است.



شکل ٤ نمودارهای جعبه‌ای متغیر لوژان، (الف) نمودارمیله‌ای دامنه تغییرات (ب) نمودارمیله‌ای ضریب تغییرات درترازهای مختلف(ج)

مدل‌سازی تغییرنما

جهت انجام شبیه‌سازی و آنالیزهای زمین‌آماری نیاز به نرمال کردن داده‌ها و ترسیم تغییرنمای مقادیر نرمال شده و برازش مدل‌های مختلف بر تغییرنما تجربی مدل است. ازاین‌جهت در این مرحله پیوستگی مکانی بر اساس تغییرنمای بدون جهت و جهت‌دار مقادیر نرمال شده متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری موردبررسی قرارگرفته است. در شکل (۵–الف)، تغییرنمای بدون جهت متغیر شاخص کیفیت سنگ مشاهده می‌شود. دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش یافته است. دامنه مدل توانی ۲۱/۲۹ و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/۵۹ بالاترین سهم از واریانس کل را دارا است. تغییرنمای مقادیر نرمال شاخص کیفیت سنگ در سه جهت مختلف محاسبه و مدل‌سازی شده است که به شرح زیر است:

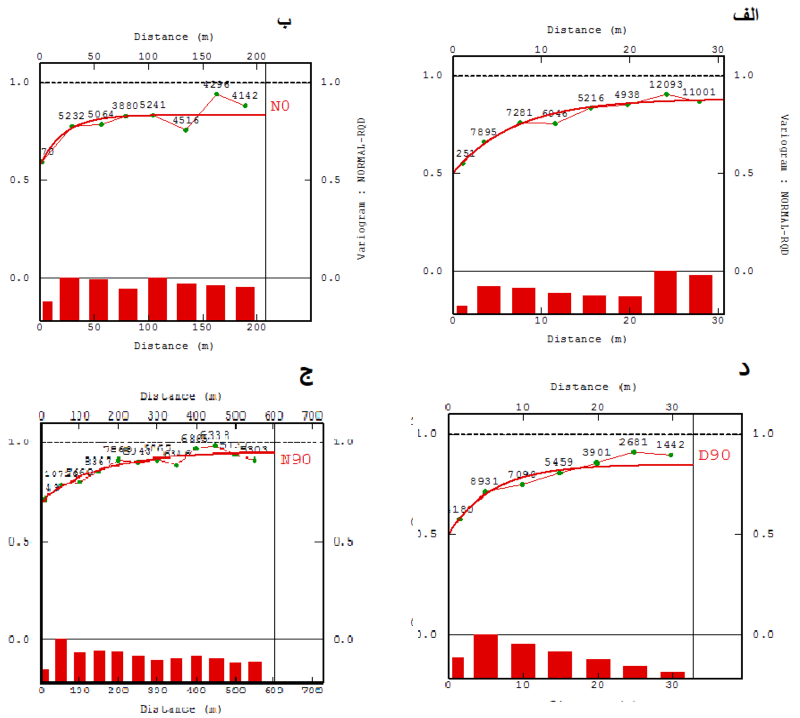
۱. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب و آزیموت صفر در شکل (۵–ب): با توجه به این شکل، مدل توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده است. دامنه مدل توانی و دامنه مدل ٦٦/٣٠ متر است و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/۷ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود.

۲. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب صفر و آزیموت ۹۰ در شکل (۵–ج): دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده ا ست. سهم اثر قطعه‌ای از واریانس کل برابر ۰/۷۵و سهم مدل توانی ۰/۲۵ است و دامنه مدل توانی برابر ٤۳۷/٥۲ متر است.

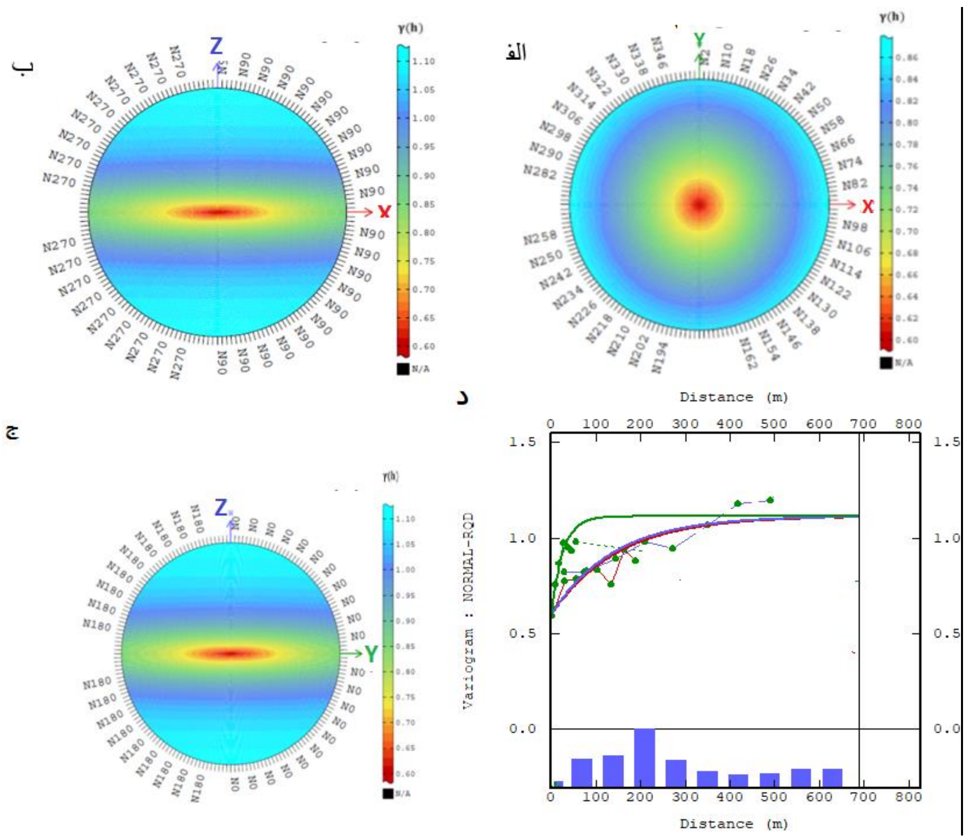
۳. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب ۹۰ در شکل (۵–د): دو مدل اثر قطعه‌ای و توانی به تغییرنمای تجربی برازش شده است و اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٦۱ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود. مجموع دامنه مدل برازش یافته به این تغییرنمای تجربی برابر ۱۷/۸۷متر است.

اشکال (٦– الف و ب) تغییرنمای سه‌بعدی به ترتیب در صفحات XY و XZ را ن شان می‌دهد. از شکل مذکور می‌توان دریافت پیو ستگی مکانی در امتداد محور شرقی–غربی بیشتر از پیوستگی مکانی در امتداد محور Z راستای گمانه‌ها است.

شکل (٦– ج) تغییرنمای سه‌بعدی در صفحه YZ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور پیوستگی مکانی در جهت Y بیشتر از جهت Z است. همچنین سه مدل تغییرنمای جهت‌دار مقادیر نرمال شده متغیر شاخص کیفیت سنگ نیز با یکدیگر تلفیق و به‌صورت یک مدل واحد ارائه‌شده است (شکل ٦–د).



شکل ۵ (الف) مدل برازش یافته تغییرنمای شاخص کیفیت سنگ بدون جهت، (ب) تغییرنما در جهت آزیموت صفر و شیب صفر، (ج) تغییرنما برازش یافته در جهت آزیموت ۹۰ و شیب صفر، (د) تغییرنما برازش شده در جهت شیب نود



شکل. ٦ (الف) تغییرنمای سه‌بعدی شاخص کیفیت سنگ در صفحه XY ، (ب) صفحه XZ ، (ج) صفحه YZ و (د) تغییرنمای تجربی به همراه مدل واحدبرازش یافته درامتدادمحورهای سه بعدی ناهمسانگردی

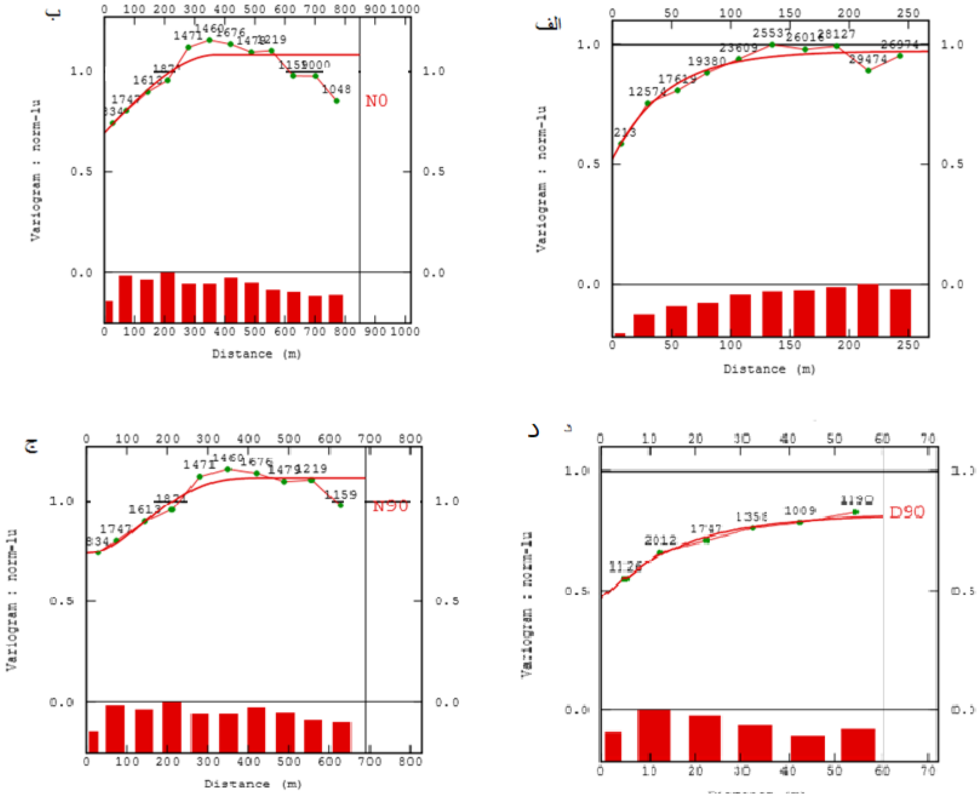
تغییرنمای تجربی جهت‌دار و بدون جهت مقادیر نرمال متغیر لوژان به همراه مدل کروی توانی و کوبیک بر مدل تجربی برازش یافته در شکل (۷) ارائه‌شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می شود دامنه مدل توانی ۱۳٦/۸۰ متر و مدل اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٥٤ بالاترین سهم از واریانس کل را دارا است. همچنین نتایج محاسبه مدل‌سازی و تغییرنمای لوژان در سه جهت مختلف عبارت است از:

٤. تغییرنمای شیب و آزیموت صفر در شکل (۷–الف): دو مدل کروی و اثر قطعه‌ای به تغییرنمای تجربی برازش شده است. دامنه مدل کروی به برابر ۳۷۱/۲٤ متر است و اثر قطعه‌ای مقدار ۰/٦٤ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود.

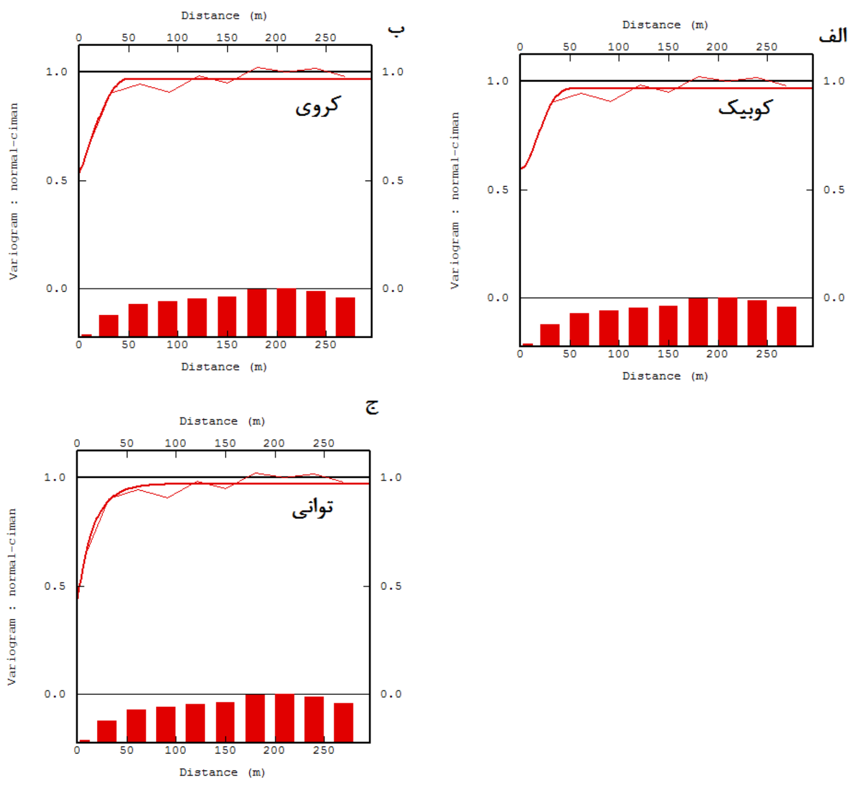
٥. تغییرنمای مقادیر نرمال برای شیب صفر و آزیموت ۹۰ در شکل (۷–ج): دو مدل اثر قطعه‌ای وکوبیک بر تغییرنمای تجربی برازش شده است. سهم اثر قطعه‌ای از واریانس کل برابر ۰/٦٦و سهم مدل کوبیک ۰/۳۳است و دامنه مدل توانی برابر با ٤٦۳/۲۹ متر می‌باشد.

٦. تغییرنمای مقادیر نرمال در شیب ۹۰ در شکل (۷–د): دو مدل توانی و اثر قطعه‌ای به تغییرنمای تجربی برازش شده است. اثر قطعه‌ای با مقدار ۰/٥٦ بالاترین سهم از واریانس کل را شامل می‌شود. مجموع دامنه مدل برازش یافته به این تغییرنما برابر ٥۲/۳٤ متر است. با تلفیق سه مدل تغییرنمای جهت‌دار مقادیر نرمال لوژان، یک مدل واحد ارائه‌شده است.

بعد از نرمال‌سازی داده‌های سیمان‌خوری، نمودار تغییرنمای تجربی مقادیر نرمال سیمان‌خوری، به همراه برازش مدل‌های کروی و توانی و کوبیک تهیه‌شده است (شکل ۸). بررسی تغییرنما در جهات مختلف نشان داد هیچ روندی در پیوستگی مکانی سیمان‌خوری مشاهده نمی‌شود و به همین دلیل تغییرنمای بدون جهت محاسبه گردیده است. با توجه به این تغییرنما پیوستگی مکانی این متغیر حدود ۱۰۰ متر بوده است.



شکل ۷ (الف) مدل برازش یافته تغییرنمای لوژان بدون جهت، (ب) تغییرنما در جهت آزیموت صفر و شیب صفر، (ج) تغییرنما برازش یافته در جهت آزیموت ۹۰ و شیب صفر و (د) تغییرنما برازش شده در جهت شیب نود

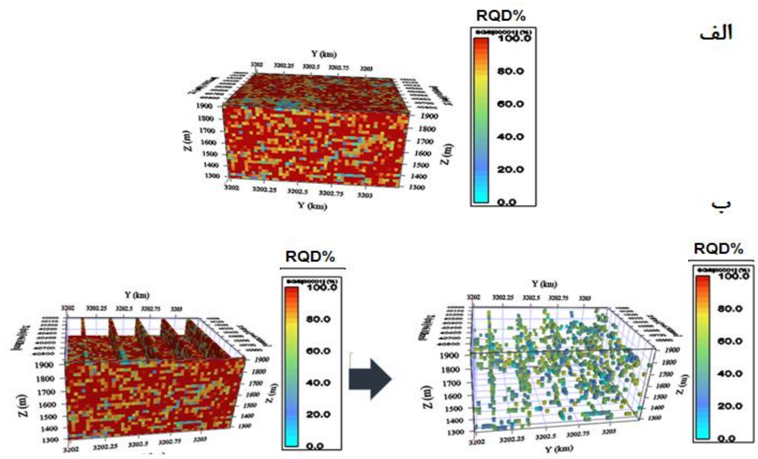


شکل ۸ تغییرنما برازش داده‌شده بر مقادیر نرمال سیمان‌خوری (مدل کروی، کوبیک و توانی)

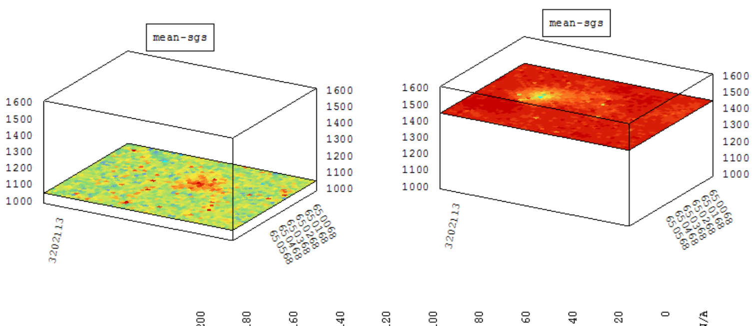
شبیه‌سازی زمین آماری

با کمک تغییرنماها، شبیه‌سازی گاوسی متوالی متغیرهای شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری، مدل‌سازی گردید. جهت نمایش این شبیه‌سازی به‌عنوان مثال شکل (۹-الف)، نمایی سه‌بعدی از بلوک شاخص کیفیت سنگ می‌باشد و شکل (۱۰-ب)، حد آستانه در ترازهای مختلف آن مشخص‌شده است به‌گونه‌ای که فقط مقادیر بالا یا پایین از یک حد آستانه مشخص را در ترازهای مختلف نشان می‌دهد که در این شکل برای شاخص کیفیت سنگ مقدار کوچک‌تر از ٦۰ درصد درنظرگرفته شده است.

بررسی مقادیر متغیرها در سه بعد و در تمامی خروجی‌های شبیه‌سازی کاری دشوار است و نیازمند به احاطه کامل بر تمامی نتایج شبیه‌سازی است؛ لذا لازم است تا شبیه‌سازها در هر سلول و یا هر منطقه معین به‌صورت خلاصه‌شده به نحوی تعیین شود. بدین سبب نتایج صد شبیه‌سازی هرکدام از سه متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری برهم منطبق شدند و مقادیر میانگین و احتمال کوچک یا بزرگ‌تر از مقادیر خاص برای هر سلول محاسبه و در نظر گرفته‌شده است. شبکه شبیه‌سازی‌شده متغیرها در راستای گمانه‌ها (جهت Z)، شامل ۲۵ سلول با اندازه‌ای برابر با ۱۰ متر است که درواقع ۲۵۰ متر شبیه‌سازی در راستای گمانه‌ها انجام‌شده است. در هر تراز ارتفاعی، کمترین شاخص کیفیت سنگ و بیشترین لوژان و سیمان‌خوری در مناطق معینی متمرکزشده است که در این مناطق میزان خردایش و نفوذپذیری بیشتر و احتمال دارای تراوایی بیشتر خواهد بود. لذا می‌توان مکان‌های مناسب را جهت تزریق سیمان در مرحله تکمیلی جهت جلوگیری از فرار آب را پیشنهاد دهد. هرچند در این نقشه‌ها مقادیر احتمال متفاوت است؛ اما روند کلی تغییرات در تمامی این نقشه‌ها یکسان خواهد بود. به‌عنوان‌مثال میانگین تغییرات مکانی لوژان حاصل از شبیه‌سازی گوسی به‌عنوان نمونه در چندین ترازهای مختلف ارتفاعی در شکل (۱۰) نمایش داده‌شده است.



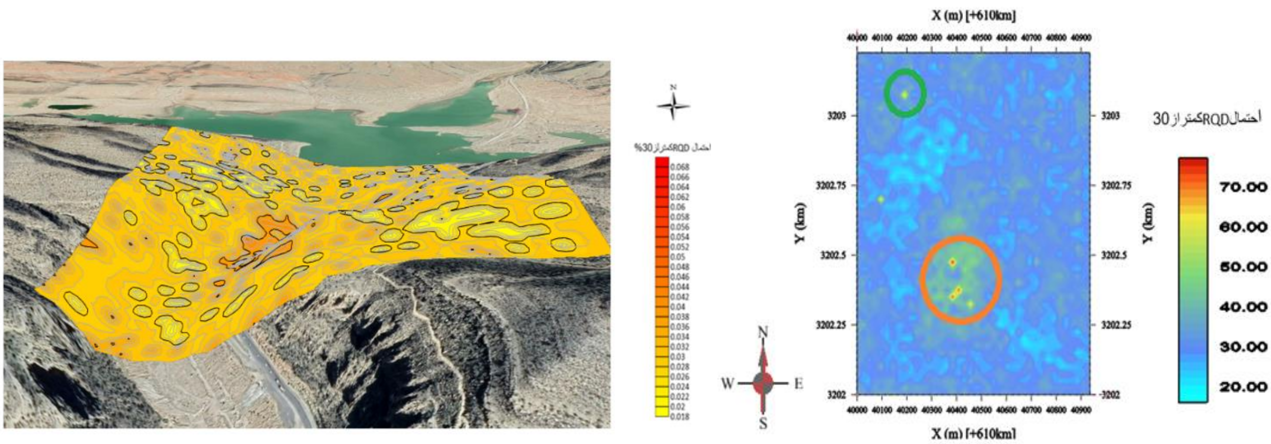
شکل ۹ (الف) نتایج بلوک سه‌بعدی شاخص کیفیت سنگ حاصل از شبیه‌سازی گاوسی در شبکه ایجادشده، (ب) نتایج شبیه‌ساز گوسی درترازهای مختلف با تغییر راستاهای (X,Y.Z)



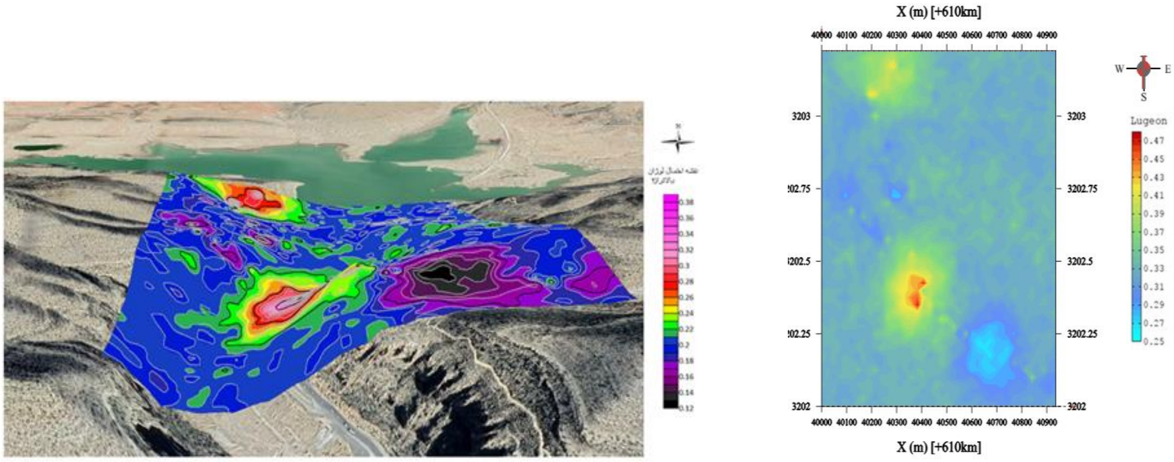
شکل ۱۰- نقشه پلان میانگین حاصل از ۱۰۰ شبیه‌سازی گاوسی لوژان در چند تراز ارتفاعی مختلف

در راستای ارزیابی عدم قطعیت مقادیر شبیه‌سازی‌شده متغیرها، شبیه‌سازی‌ها بر روی یکدیگر منطبق شده و احتمال بزرگ یا کوچک‌تر از یک آستانه محاسبه‌شده است. با توجه به اینکه تشخیص زون‌های تراوا با مقادیر شاخص کیفیت سنگ پایین، مقادیر بالای لوژان و سیمان‌خوری مدنظر است؛ نقشه‌های احتمال کوچک‌تر بودن مقادیر شاخص کیفیت سنگ از مقدار حد آستانه ۳۰ درصد، بالاتر بودن لوژان و سیمان‌خوری از مقادیر حد آستانه به ترتیب ۲ و ۱۰۰ کیلوگرم در واحد طول تهیه‌شده است. از این نقشه‌ها می‌توان در تعیین عدم قطعیت در راستای تعیین نقاط مناسب جهت تزریق سیمان و جلوگیری از فرار آب استفاده نمود. جهت شناسایی بهتر نقاط بهتر است نقشه متغیر را در ترازهای مختلف ارتفاعی ترسیم و با یکدیگر مقایسه کرد. در اشکال (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) چند نمونه از نقشه احتمال مقادیر سه متغیر شاخص کیفیت سنگ، لوژان و سیمان‌خوری کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از یک حد آستانه ترازهای مختلف مشاهده می‌شود. با توجه به این نقشه‌ها مشاهده می‌شود در محدوده‌ی مخزن و کمی جناح راست سد احتمال مقادیر شاخص کیفیت سنگ کوچک‌تر از ۳۰، احتمال بالاتر از ۲ و ۱۰۰ برای متغیرهای لوژان و سیمان‌خوری وجود دارد. به‌منظور بررسی رابطه بین گسل‌ها، نقشه‌های حاصل از میانگین احتمال شاخص کیفیت سنگ کمتر از۳۰ با نقشه گسل‌های موجود در منطقه تطبیق داده‌شده است (شکل ۱٤)، نتایج نشان‌دهنده این است که در بدنه مخزن و جناح راست سد در نزدیکی و در محل تلاقی گسل‌ها احتمال فرار آب در اثر وجود مناطق با تراوایی بالا افزایش‌یافته است. اگر نقشه‌ی حاصل از احتمال مقادیر لوژان بالاتر از ۲، نقشه احتمال شاخص کیفیت سنگ پایین‌تر از ۳۰ و نقشه احتمال سیمان خوری جهت مقادیر بزرگ‌تر ۱۰۰ کیلوگرم بر متر با یکدیگر مقایسه شود، می‌توان دریافت که در دو محل مرکز مخزن سد و شمال غربی آن انطباق خوبی بین مقادیر پایین شاخص کیفیت سنگ، مقادیر بالای سیمان خوری و لوژان وجود دارد. درحالی‌که در بعضی از نقاط ازجمله نواحی شمال شرق مخزن، روند تغییرات مقادیر احتمال شاخص کیفیت سنگ و لوژان با یکدیگر سازگاری کمی نشان می‌دهند. البته از آنجاییکه همراه با برداشت داده های لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمانخوری، اطلاعات لیتولوژی و درزه برداری ثبت نشده است؛ نمیتوان بطور دقیق مشخص کرد که آیا لوژانهای بالا یا شاخص کیفیت سنگ پایین مرتبط با سازنده‌های آهکی (کارستی) یا درزه و شکاف های واحدهای سنگی هستند.

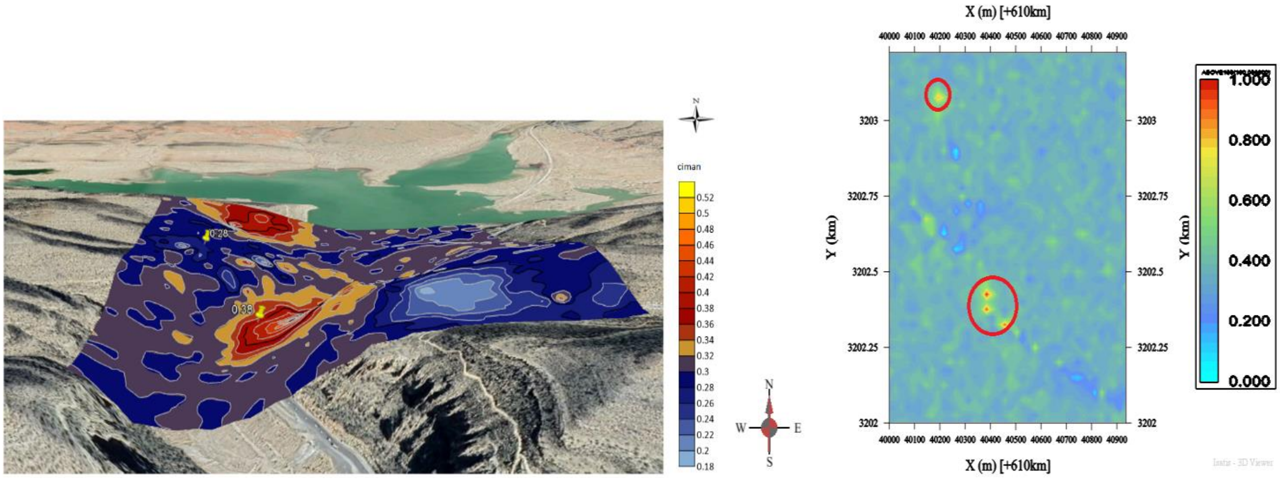
قابل‌ذکر است نتایج شبیه‌سازی هنگامی قابل‌قبول‌اند که قادر به دوباره‌سازی پارامترهای آماری و زمین‌آماری داده‌های اکتشافی باشند. بدین منظور نمودار فراوانی نمای به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی ونمودارهیستوگرام داده‌های واقعی داده (داده‌های گمانه‌های اکتشافی) در نظر گرفته شد (شکل ۱۵). ملاحظه می‌شود که میانگین حاصله از نتایج شبیه‌سازی با میانگین حاصله از تحلیل آماری داده‌های گمانه‌های اکتشافی تقریباً برابر است درنتیجه نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌خوبی قادر به تولید مجدد پارامترهای آماری داده بوده است و از این لحاظ دارای اعتبار هستند.



شکل ۱۱- نقشه پلان احتمال متغیر شاخص کیفیت سنگ با مقادیر کمتر از ۳۰ درصد (دوایر رنگی جهت نشان دادن مکان هایی که درآن ها متغییر مورد نظر مقادیر احتمال بالاتری را دارد)

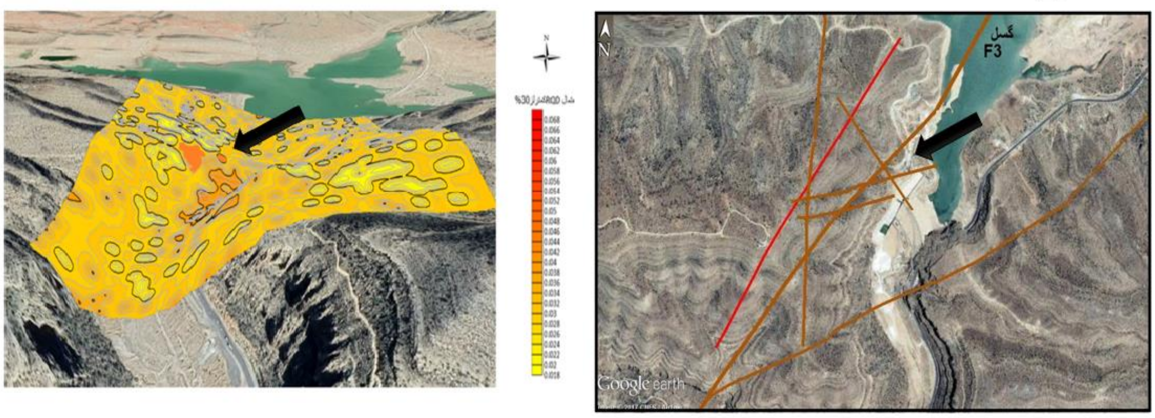


شکل ۱۲ نقشه پلان احتمال مقادیر لوژان با مقادیر بالاتر ازحد آستانه ۲

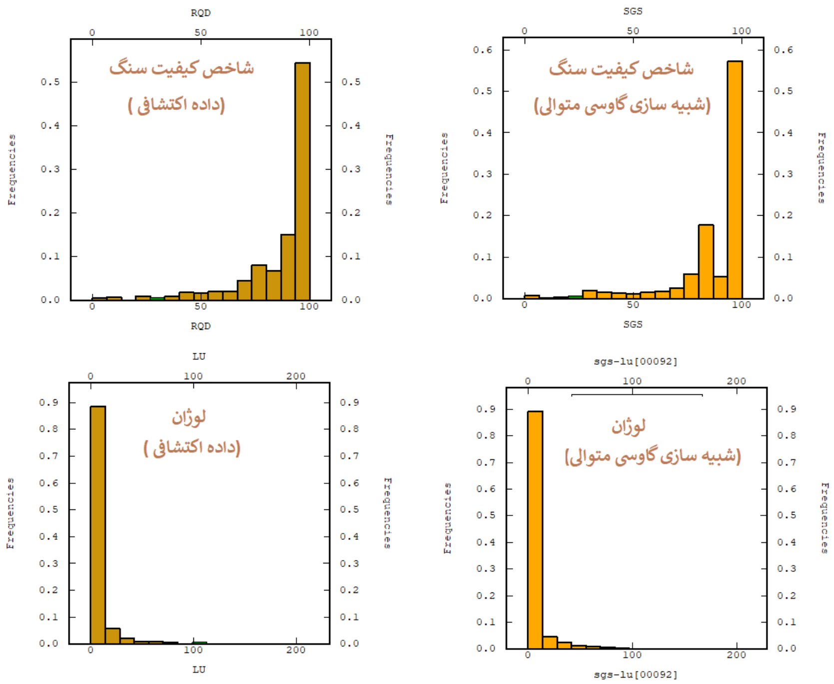


شکل ۱۳ نقشه پلان احتمال سیمان‌خوری برای مقادیر با حد آستانه بالاتر از ۱۰۰کیلوگرم بر متر (دوایر رنگی جهت نشان دادن مکان هایی که درآن ها متغییر مورد نظر مقادیر احتمال بالاتری را دارد)

ب الف



شکل ۱۴ (الف) نمایش گسل‌ها در اطراف سد و (ب) نمایش مقادیر احتمال شاخص کیفیت سنگ کمتر از۳۰ بر روی سطح زمین



شکل ۱۵ نمودار هیستوگرام مقادیر داده‌های اکتشافی برداشت از گمانه‌ها ومقادیرشبیه سازی شده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مناطق دارای پتانسیل فرار آب درسدتنگاب با استفاده از شبیه‌سازی گاوسی متوالی موردبررسی قرار گرفت. با توجه به نقشه‌های شبیه‌سازی سه متغیر لوژان، شاخص کیفیت سنگ و سیمان‌خوری در دو محل واقع در مرکز مخزن و شمال غربی سد، مناطق با نفوذپذیری بالا شناسایی‌شده است. لذا در این مکان‌ها پتانسیل فرار آب وجود دارد. بررسی گسل‌های منطقه موردمطالعه نیز نشان داد تراکم گسل‌ها بیشتر در جناح راست سد بوده به همین دلیل وجود گسل‌ها می‌تواند سبب افزایش نفوذپذیری واحدهای سنگی شده باشد. بااین‌وجود در بعضی از نقاط به‌ویژه جناح چپ مخزن سد، ارتباط و همپوشانی بین مقادیر حداکثر لوژان و حداقل شاخص کیفیت سنگ، دیده نشده است که می‌تواند به دلیل ماهیت متفاوت و نحوه اندازه‌گیری دو متغیر شاخص کیفیت سنگ و لوژان،باشد و همچنین یکسان نبودن عمق گمانه‌ها و برخورد گمانه‌ها در ترازهای مختلف ارتفاعی با لایه‌هایی با خصوصیات مختلف را نیز می‌توان از دلایل این موضوع ذکر کرد.درنهایت پیشنهاد می‌گردد تلفیق اطلاعات زمین‌آمار با اطلاعات ژئوالکتریک در شبیه‌سازی زمین‌آماری انجام شود و در مطالعات مشابه، در هنگام اندازه‌گیری داده‌های شاخص کیفیت سنگ داده‌برداری درز و شکاف مغزه‌های سنگ انجام شود و مطالعات و تفسیرهای شاخص سنگ کیفیت بر اساس درز و شکاف صورت گیرد. همچنین باید اشاره کرد محل پیزومترها، تزریق ماده رنگی و برداشت نمونه های رنگی و هیدروشیمیایی در مطالعات قبلی در مناطق دورتر از موقعیت چاه های مشاهده ای و چاههای ژئوتکنیک کنونی قرار داشتند و در حال نیز آن پیزومترهای یا تخریب شده اند و یا سطح ایستابی آنها برداشت نمی شود. لذا در مطالعات پیشین، درمورد مسیر حرکت آب زیرزمینی و نقاط با نفوذپذیری بالا و یا کم در محدوده مطالعاتی این تحقیق، نتایجی نداشته اند که بتوان مقایسه ای در خصوص نتایج داشت.

مراجع

1. Jaquet, O., Siegel, P., Klubertanz, G., Benabderrhamane, H., "Stochastic discrete model of karstic networks", *Advances in Water Resources*, Vol. 27 (7), pp. 751–760, (2004).
2. Issaks, E. H., Srivastava, R. M., "Applied Geostatistics", Newyork, Oxford University Press, (1989).

3. Huysmans, M., Dassargues, A., "Application of multiple-point geostatistics on modelling groundwater flow and transport in a cross-bedded aquifer (Belgium)", *Hydrogeology Journal,* Vol. 17(8), pp. 1901– 1911, (2009).
4. Madani Esfahani, N., Asghari, O., "Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD)", *Arabian Journal of Geosciences,* Vol. 6(10), pp. 3737–3747, (2012).
5. Marache, A., Breysse, D., Piette, C., Thierry, P., "Geotechnicalmodeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: the Pessac case (France)", *Engineering Geology*, Vol. 107(3-4), pp. 67-76, (2009).

۶. ساسانی نیا، ندا.، بهرام حبیب نیا، و حسین قبادی، "تخمین تخلخل و توزیع فضایی تراوایی با استفاده از مدل زمین‌آماری دریکی از میدان‌های نفتی جنوب غربی ایران"، کنفرانس بین‌المللی علوم و مهندسی، امارت–دبی، موسسه ایده پرداز پایتخت ویرا، (۱۳۹۴).

۷. عالی‌انوری، علی.، همایون کتیبه، و حمید محمودآبادی، "تخمین نفوذپذیری معادل در امتداد محور تونل امیرکبیر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، دومین کنفرانس مهندسی معدن تهران، دانشگاه تهران، (۱۳۸۷).

۸. مشرفی فر، محمدرضا.، کاظم برخورداری، و حمید موسوی، "ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی سد مخزنی ایوشان"، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری بابل، مؤسسه علمی تحقیقاتی کومه علم آوران دانش، (۱۳۹۵).

9. Lu, L., Kashiwaya, K., Koike, K., “Geostatistics-based regional characterization of groundwater chemistry in a sedimentary rock area with faulted setting”, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, pp. 829, (2016).
10. Assari, A., Mohammadi , Z., “Analysis of rock quality designation (RQD) and Lugeon values in a karstic formation using the sequential indicator simulation approach, Karun IV Dam site, Iran”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* Vol. 76(2), pp. 1–12, (2016).
11. Yu, Y., “Geostatistical Interpolation and Simulation of RQD Measurements, M.Sc Dissertation”, University of British Columbia (Vancouver), (2010).
12. Wuing , Liu, Ch., Shin, Jang, Ch., Min Liao, Ch., “Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan)”, *Science of the Total Environment*, Vol. 321(1-3), pp. 173–188, (2004).

۱۳. عصاری، امین.، و ضرغام محمدی، "شبیه سازی ضریب آبگذری بااستفاده‌از روش‌های زمین‌آماری باهدف تعیین محل چاه‌های پمپاژ مطالعه موردی معدن گل‌گهر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی دانشگاه شاهرود، (۱۳۹۲).

14. Ahmdi, SH., Sedghamiz, A., “Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level”, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 129 (1-3), pp. 277–294, (2007).

۱۵. نخعی بهشته.، "استفاده از روش‌های شبیه سازی استوکاستیک جهت تعیین زون‌های تراوا در سازند سخت پیت معدن گهر زمین، استان کرمان"، ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی–آب‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، (۱۳۹۷).

۱۶. اسدی، ناصر.، "بررسی مسئله فرار آب از سد تنگاب فیروزآباد بااستفاده‌از ردیاب رنگی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی–زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز، (۱۳۷۷).

17. Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M., “Physicochemical time series of karst springs as a tool to differentiate the source of spring water”, *Carbonates and Evaporites*, Vol. 20(2), pp. 138–147, (2005).
18. Akhondi, M., Mohammadi, Z., “Preliminary analysis of spatial development of karstusing a geostatistical simulation approach”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73(4), pp. 1037–1047, (2014).

۱۹. محمودی، امین.، "محمد صدقی اصل.، منصور پرویزی، و ارسلان مهرکی، بررسی نشت در جناح راست سد خاکی مطالعه موردی سد خاکی تنگاب فیروزآباد"، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، (۱۳۹۲).

۲۰. کریمی، حاجی.، عزتا... رئیسی، و محمد زارع، "بررسی رابطه بین تغییرات سطح آب نفوذپذیری لایه‌های زمین‌شناسی بااستفاده‌از شبکه پیزومتری"، اولین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست تهران، انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دانشگاه تربیت‌معلم، (۱۳۷۸).

۲۱. جاور، حسن.، و علی‌محمد حسین نژاد، "آب‌بندی سد تنگاب فیروزآباد فارس با خروج مواد ریزدانه از تشکیلات ر سوبی و سنگی و طراحی گمانه‌های متقاطع"، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، (۱۳۸۷).

22. Boufekane, A., Yahiaoui, S., Meddi, H., Meddi, M., Busico, G., “Modified DRASTIC index model for groundwater vulnerability mapping using geostatistic methods and GIS in the Mitidja plain area (Algeria)”, *Environmental Forensics*, (2021), doi.org/10.1080/15275922.2021.1913674.

23. Faria, P. H., Coimbra, Leite Costa J. F., Arcari Bassani, M. A., “Multivariate geostatistical simulation with PPMT: an application for uncertainty measurement”, *Applied Earth Science*, Vol. 130(3), pp 174-184. (2021).

24. Jalili, Pirani F., Modarres, R., “Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran”, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 65(16), pp, 2678-2692. (2020).

25. Mallik, S., Bhowmik, T., Mishra, U., Paul, N., “Mapping and prediction of soil organic carbon by an advanced geostatistical technique using remote sensing and terrain data”, Geocarto International, (2020). doi.org/10.1080/10106049.2020.1815864.

26. Narjary, B., Kumar, S., Meena, M., Kamra, S.K., Sharma, D. K., “Spatio-temporal mapping and analysis of soil salinity: An integrated approach through Electromagnetic induction (EMI), multivariate and geostatistical techniques”, Geocarto International, (2021). doi.org/10.1080/10106049.2021.2002952.

27. Zhang, W., Wang, S., Song, S., Tan, C., Ma, Z., Shan, B., Xu, P., “Determination of representative volume element with consideration of linear anisotropy using geostatistics approach”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2020). doi.org/10.1080/19648189.2020.1815588.

28. Issaks, E. H., Srivastava, R. M., “Applied Geostatistics, Newyork”, Oxford University Press, (1989).

۲۹. حسنی پاک، علی‌اصغر.، محمد شرف‌الدین، "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران، (۱۳۸٤).

۳۰. مدنی، حسن.، "مبانی زمین‌آمار"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، (۱۳۹۱).